



Influence de l'hygrométrie sur le comportement différé du gypse en carrière souterraine

Christophe Auvray, Françoise Homand, Dashnor Hoxha, Christophe Didier,
Claudia Sorgi

► To cite this version:

Christophe Auvray, Françoise Homand, Dashnor Hoxha, Christophe Didier, Claudia Sorgi. Influence de l'hygrométrie sur le comportement différé du gypse en carrière souterraine. Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France. pp.315-324. ineris-00972465

HAL Id: ineris-00972465

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972465>

Submitted on 3 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DE L'HYGROMETRIE SUR LE COMPORTEMENT DIFFERE DU GYPSE EN CARRIERE SOUTERRAINE

Christophe AUVRAY¹, Françoise HOMAND¹, Dashnor HOXHA¹, Christophe DIDIER², Claudia SORGI²

1 LAEGO-INERIS-INPL, rue du Doyen Marcel Roubault 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy France

2 INERIS-DRS, Parc Technologique Alata 60550 Verneuil-en-Halatte France

RESUME – Le comportement différé des piliers de gypse dans les carrières souterraines peut être influencé par les variations de l'hygrométrie. Cette influence a été étudiée en corrélant des mesures de la convergence de plusieurs galeries et celles de l'hygrométrie dans des conditions d'aérage différentes. Des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée, réalisés au laboratoire, ont permis de comprendre et modéliser ce comportement.

1. Introduction

Dans un cadre général d'après-mine, les effets du temps et la variation de paramètres physiques sur le comportement d'une carrière souterraine sont responsables de différents mécanismes de dégradation :

- la dégradation des minéraux constitutifs de la roche par action physico-chimique conduisant à une diminution des caractéristiques mécaniques, le vieillissement ;
- le comportement différé sous chargement constant, le fluage ;
- les variations de paramètres physiques et des conditions de saturation du milieu rocheux par action de la succion, dans les zones où les conditions d'aérage changent ou bien encore des conditions gazeuses par enrichissement ou appauvrissement en oxygène ou dioxyde de carbone.

Dans cet article nous nous limitons à l'étude du comportement différé d'une roche particulière en fonction de l'hygrométrie : le gypse. Des mesures de convergence de galeries ont été réalisées en vue d'étudier le comportement différé des piliers de gypse en fonction des conditions d'aérage et donc en fonction de l'hygrométrie présente dans l'atmosphère minière.

Pour compléter les mesures effectuées par l'exploitant pendant près de 20 ans entre 1978 et 1998, plusieurs mesures de convergence ont été reprises pendant la période 2003-2004 avec une fréquence mensuelle. En plus de toutes ces mesures de convergence, l'hygrométrie et la température ont été également enregistrées dans deux quartiers où les conditions d'aérage sont différentes. Les mesures de ce paramètre physique peuvent être justifiées étant donné le caractère hygro-sensible de ce matériau (Bosbach et Rammensee, 1994 ; Finot et al., 1997 ; Badens, 1998 ; Jeschke et al., 2001 ; Mandal et Mandal, 2002).

Pour l'interprétation des résultats, nous nous attacherons à identifier les relations entre les variations de paramètres physiques et le comportement différé des piliers de gypse. L'influence éventuelle des variations des paramètres physiques sera validée par des essais réalisés au laboratoire.

2. Présentation de l'expérimentation

2.1. Site instrumenté : carrière de Grozon

La carrière souterraine de Grozon (Jura) a été choisie pour l'évolution de son instabilité et pour ses quartiers d'âge d'exploitation différent. L'ensemble du site a environ une superficie de 500 hectares. Le gypse est exploité par chambres et piliers sur un ou deux niveaux. Il appartient à la série stratigraphique du Keuper supérieur. Les piliers mesurent généralement 6 mètres par 6 mètres et 2,5 mètres de hauteur. Le taux de défrètement est compris entre 75 et 78%.

Cependant ce schéma d'exploitation a varié à certaines époques et par exemple, pour de très vieux travaux, le taux de défrètement est supérieur à 80%.

Le recouvrement varie également entre les différents quartiers d'exploitation : de 2 à 10 mètres pour l'ancien quartier retenu et 50 mètres pour le quartier en cours d'exploitation. Les caractéristiques hydrogéologiques sont homogènes sur l'ensemble du site, il n'existe pas de nappe, seules les conditions hydriques des terrains sont différentes suivant les précipitations (Auvray 2003).

2.2. Dispositif de mesures

Deux types d'instruments de mesure ont été installés par l'exploitant dans différents quartiers de l'exploitation. Des convergencemètres permettaient de mesurer les rapprochements entre les piédroits de deux piliers voisins grâce à un fil invar fixé sur l'un des deux piliers et à une tête de lecture fixée sur l'autre piler. La précision de cette mesure était de $\pm 10 \mu\text{m}$. Des extensomètres à fils invar, à trois points de mesure, étaient ancrés à différentes profondeurs dans le piler. La précision de cette mesure était de $\pm 10 \mu\text{m}$.

Depuis mars 2003, de nouveaux ancrages ont été scellés sur les piédroits de plusieurs piliers déjà instrumentés. L'ancienne instrumentation datait de 1977 et elle ne fonctionnait plus correctement. Des piliers d'âge d'exploitation récent ont également été instrumentés. La précision des nouvelles mesures de convergence est aussi de $\pm 10 \mu\text{m}$. Des mesures d'hygrométrie et de température ont été réalisées dans deux secteurs différents de l'exploitation. Le premier hygromètre/thermomètre est placé à proximité des travaux actuels, l'aérage y est forcé. A l'inverse, le second hygromètre/thermomètre est situé dans un quartier d'âge d'exploitation ancien où l'aérage est extrêmement réduit. La gamme de mesures de l'hygrométrie est 0 à 100% avec une précision de $\pm 2\%$ dans la gamme 0-90% et $\pm 3\%$ dans la gamme 90-100%. La précision de la mesure de la température est de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. L'ensemble des différentes stations de mesure, actuelles et passées, est localisé sur la figure 1. Il est important de noter que les quartiers aérés sont différents pendant la vie de la carrière. La station EC est instrumentée avec 2 extensomètres et 4 convergencemètres. Le détail du dispositif est présenté sur la figure 2. Les mesures de convergence fournissent le déplacement relatif de deux points sur des piédroits opposés mais ne permettent pas, à elles seules, d'identifier l'origine du déplacement. C'est pourquoi, ces mesures ont été complétées par des mesures d'extensométrie au sein de deux piliers. La cohérence des mesures a pu être vérifiée.

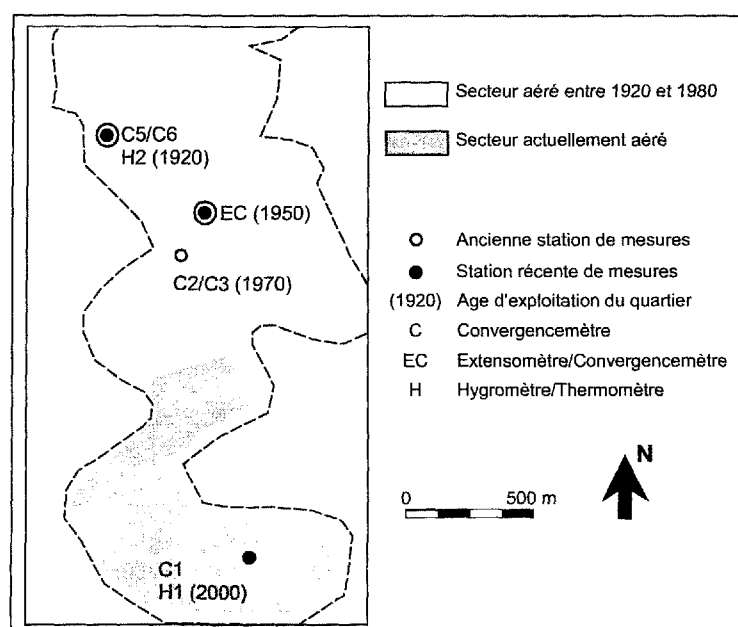


Figure 1. Localisation des stations de mesures

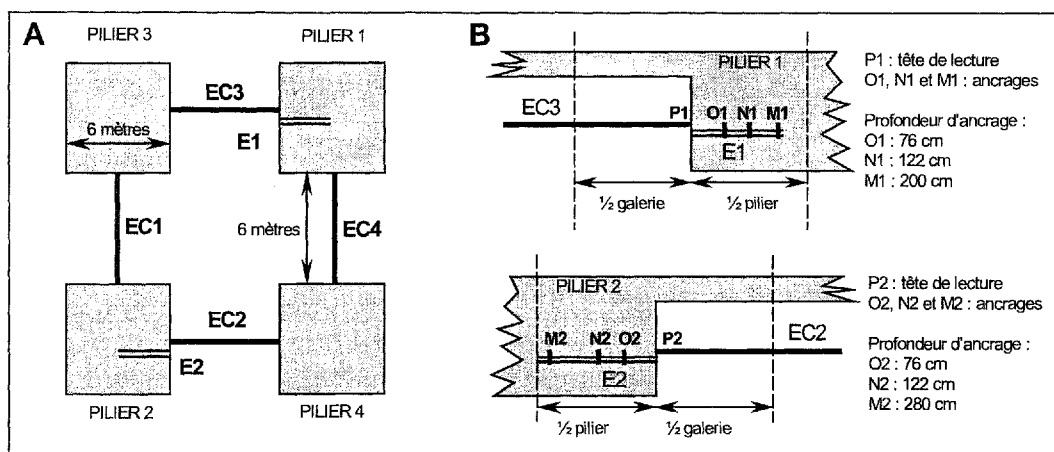


Figure 2. Dispositif de mesures entre 4 piliers de la station EC
(EC : convergencemètre ; E : extensomètre)

3. Résultats

3.1. Mesures de convergence et d'expansion entre 1978 et 1998

Pour chacune des stations de mesure, les courbes de convergence des galeries et les courbes d'expansion des piliers ont été tracées (Figures 3 et 4). Les vitesses moyennes de fermeture des galeries ou d'expansion des piliers ont été calculées à l'aide d'une régression linéaire des courbes fermeture-temps ou expansion-temps (Tableaux 1 et 2). Les déformations entre le bord des piliers et les différents points d'ancrage ont été calculées pour les deux piliers de la station de mesures EC. Les vitesses moyennes de déformation entre bord des piliers-points d'ancrage et entre les différents points d'ancrage ont également été déterminées à partir d'une régression linéaire des courbes déformation-temps (Tableau 3).

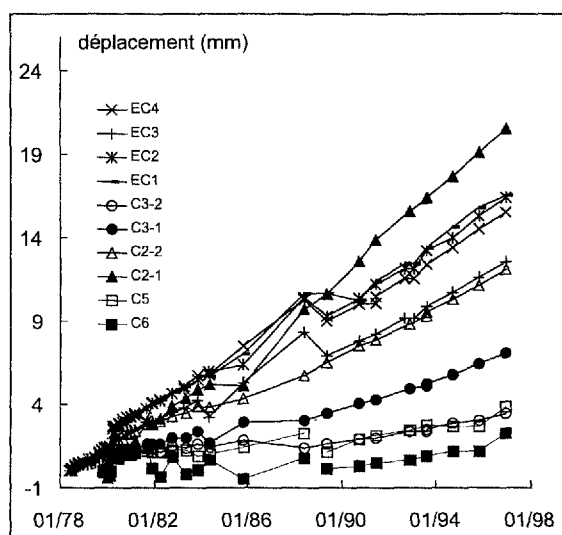


Figure 3. Convergence horizontale de différentes galeries

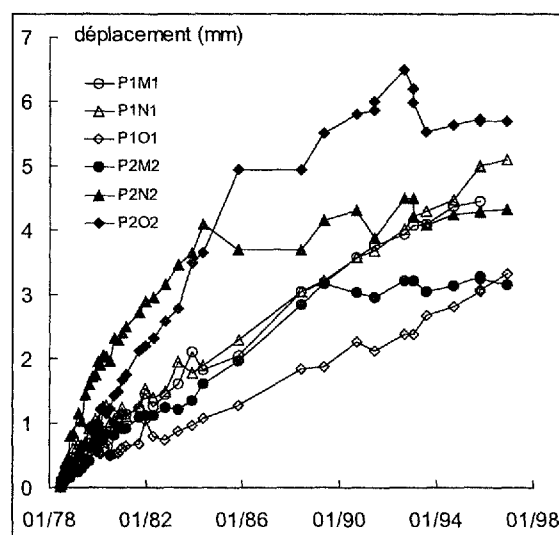


Figure 4. Expansion des deux piliers de la station EC

Tableau I. Vitesses moyennes de fermeture de galeries et d'expansion de deux piliers

	C5	C6	EC1	EC2	EC3	EC4	C2-1	C2-2	C3-1	C3-2
Age d'exploitation	1920		1950				1970			
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97									
Vitesse moyenne de convergence (mm/an)	0,10	0,01	0,90	0,90	0,70	0,80	1,20	0,60	0,30	0,10

Tableau II. Vitesses moyennes d'expansion de deux piliers

	Pilier 1			Pilier 2		
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97			du 01/85 au 01/97		
	P1O1	P1N1	P1M1	P2O2	P2N2	P2M2
Vitesse moyenne d'expansion bord de pilier-points d'ancrage (mm/an)	0,10	0,20	0,20	0,07	0,07	0,07
	P1O1	O1N1	N1M1	P2O2	O2N2	N2M2
Vitesse moyenne d'expansion entre points d'ancrage (mm/an)	0,10	0,10	<0,01	0,07	<0,01	<0,01

Tableau III. Vitesses moyennes de déformation de deux piliers

	Pilier 1			Pilier 2		
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97			du 01/85 au 01/97		
	P1O1	P1N1	P1M1	P2O2	P2N2	P2M2
Vitesse moy. de déformation ($10^{-12}.s^{-1}$) bord de pilier-points d'ancrage	2,3	2,3	0,11	1,15	0,4	0,3
	P1O1	O1N1	N1M1	P2O2	O2N2	N2M2
Vitesse moyenne de déformation ($10^{-12}.s^{-1}$) entre points d'ancrage	2,3	2,3	≈0	1,15	≈0	0,2

D'une manière générale, les vitesses moyennes de fermeture des galeries semblent diminuer dans le temps. Les vitesses moyennes calculées dans un quartier d'âge d'exploitation 1970 sont plus rapides que celles qui ont été calculés dans un quartier d'âge d'exploitation plus ancien. Cette comparaison n'est valide que si les vitesses initiales étaient les mêmes. Cependant, l'expansion du pilier 2 permet de montrer une diminution du déplacement dans le temps (Figure 4 et Tableau 3). Enfin, Les mesures de convergence de la station EC sont réalisées entre quatre piliers immédiatement proches les uns des autres, les vitesses moyennes sont comparables entre elles.

3.2. Nouvelles mesures

De nouvelles mesures de convergence ont été entreprises (Figure 5), elles ont été complétées avec un enregistrement de l'hygrométrie et de la température de l'air dans deux quartiers où les conditions d'aérage sont différentes (Figure 6). Le dispositif et les conditions actuelles d'aérage sont les suivantes : dans un quartier en cours d'exploitation où l'aérage est forcé, deux nouvelles stations ont été instrumentées avec des convergencemètres (C1-1 et C1-2) et un hygromètre/thermomètre (H1). Dans une zone anciennement exploitée où l'aérage est actuellement naturel, donc faible, les mesures de convergence EC2 et C6 ont été reprises avec une fréquence mensuelle. Un hygromètre/thermomètre (H2) a également été installé dans ce quartier.

La température mesurée dans les deux quartiers ne présente pas de variations significatives. Elle est constante tout au long de l'année : $12,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. L'hygrométrie dans le quartier sans aérage forcé est relativement constante autour de 73%. Des pics d'hygrométrie de faibles amplitudes sont mesurés durant toute l'année. A l'inverse, les variations de l'hygrométrie dans le quartier aéré sont plus importantes :

- Les valeurs les plus élevées (proches de 95%) sont mesurées en été et en automne (repère 1 sur la figure 6). En été, elles sont dues aux températures extérieures élevées qui génèrent une très forte évapotranspiration. Les pluies orageuses pendant cette période accentuent le phénomène d'évaporation. Malheureusement, les limites de mesures des hygromètres sont atteintes et ces événements ne peuvent être enregistrés.
- Les hygrométries les plus faibles (environ 70%) sont mesurées pendant les mois qui correspondent aux mois d'hiver et de printemps. Pendant cette période, des augmentations brutales et ponctuelles de l'hygrométrie sont enregistrées (repère 2 sur la figure 6).

- Entre ces deux périodes, les phases transitoires montrent des augmentations brutales et ponctuelles de l'hygrométrie probablement dues à des épisodes pluvieux remarquables (repère 3 sur la figure 6).

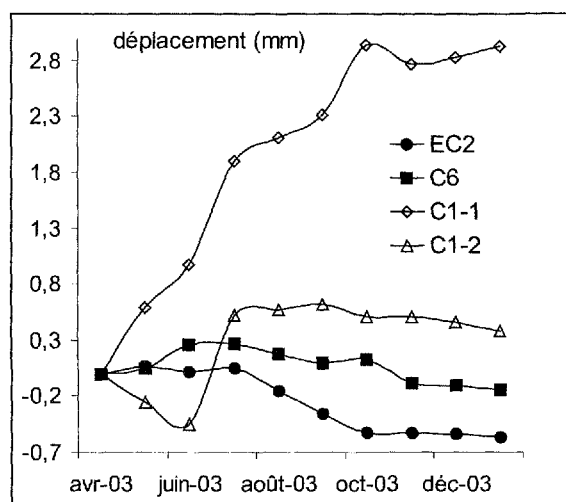


Figure 5. Convergence horizontale de galeries (nouvelles mesures)

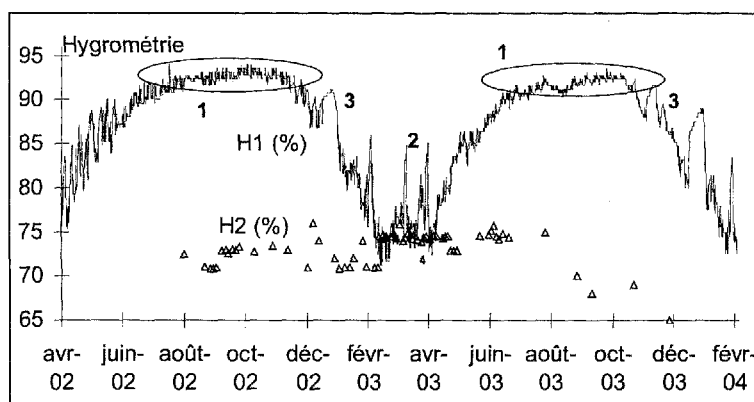


Figure 6. Hygrométrie dans deux quartiers avec des conditions d'aérage différentes

4. Interprétation- Discussion

4.1. Mesures expérimentales *in situ*

D'après le calcul des déformations entre bord de pilier-points d'ancrage et entre les points d'ancrage, c'est en peau de pilier que les déformations sont les plus importantes. Un endommagement concentrique des piliers, peut-être dû en partie à l'humidité de l'air, pourrait expliquer les différences de vitesses moyennes de déformation entre la peau et le cœur. De plus, l'effet des changements des conditions hydriques des terrains et donc de la charge sur les piliers ne peut être négligé.

L'hypothèse d'une dégradation du gypse par la vapeur d'eau s'appuie sur les résultats de travaux antérieurs montrant une évolution de l'intensité des traces de dissolution (Auvray 2003, Auvray et al., 2004). En effet, des observations au microscope électronique à balayage ont été réalisées sur des échantillons de gypse. Ces derniers ont été prélevés tous les dix ou quinze centimètres sur toute la longueur de sondages horizontaux vers le cœur de pilier de gypse. Cette technique d'observation déjà utilisée (Viles et Moses, 1998 ; Aires-Baros et al., 1975) a permis de mettre en évidence une diminution de l'intensité des traces de dissolution des cristaux de gypse vers le cœur des piliers. Au bord de ces derniers, les cristaux sont totalement corrodés et vers le cœur, ils ne présentent plus de trace de corrosion.

Cette hypothèse est également renforcée par la variation plus ou moins importante de paramètres physico-mécaniques mesurés entre le bord et le cœur des piliers. Différents paramètres physiques et mécaniques ont été déterminés à partir de plusieurs échantillons, sur l'ensemble des mêmes sondages (masses volumiques sèche, et des grains, porosité totale et accessible à l'eau, perméabilité à l'azote, vitesse des ondes ultrasonores de compression P et de cisaillement S, module de Young et coefficient de Poisson dynamiques, résistance en compression uniaxiale et module de Young). La porosité accessible à l'eau diminue du bord vers le cœur des piliers. L'eau (sous forme de vapeur et/ou liquide) dissout progressivement les cristaux de gypse et pénètre vers le cœur des piliers. La dissolution a pour conséquence directe une augmentation de la porosité accessible à l'eau (saturée en sulfate de calcium). Ceci se traduit également par la variation moyenne de la perméabilité à l'azote, qui diminue du bord vers le cœur des piliers. Les vitesses des ondes ultrasonores P et S augmentent du bord vers le cœur des piliers. Directement liés, le coefficient de Poisson dynamique (fonction de la vitesse

des ondes ultrasonores) et le module de Young dynamique (fonction de la vitesse des ondes ultrasonores et de la masse volumique) augmentent également. Ceci signifie que les vides de type fissure et pores sont quantitativement plus importants au bord des piliers. D'après les observations au microscope électronique à balayage, il s'agirait plutôt de vides de type cavités de dissolution. A partir des résultats précédents, la résistance du gypse doit augmenter vers le cœur des piliers, car le bord de ces piliers est plus endommagé que le cœur et est constitué de matériau plus poreux. Les résultats des essais de compression uniaxiale et la variation moyenne du module de Young le confirment, car résistance et module augmentent du bord vers le cœur des piliers.

Les conséquences de l'altération sur les paramètres physico-mécaniques avaient déjà été mises en évidence sur des échantillons de différentes roches : charnockite (Ramana et Gogte, 1982), granite et marbre (Jeannette, 2000) et argiles (Canton et al. 2001). Par contre il n'existait pas dans la littérature de relation entre hygrométrie et vieillissement de la roche.

Une analyse des mesures de la convergence des galeries et de l'expansion des piliers, sur une année, montre des changements de rythme de déformation. Cette observation est valable pendant la période 1978-1998 mais également pendant l'année 2003. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces discontinuités :

- une erreur de mesure,
- une modification du circuit des engins d'extraction,
- un changement de zone d'exploitation,
- une modification du circuit d'aérage,
- un changement des conditions hydriques des terrains,
- une saisonnalité d'un paramètre physique externe.

Une erreur de mesure ne peut pas être négligée. Des points de mesure isolés, n'ayant aucune signification, doivent être écartés avant toute interprétation.

Les hypothèses concernant une modification de sens de circulation des engins, un changement de zone d'exploitation et une modification du circuit d'aérage peuvent être écartées. En effet, les conséquences de tels changements d'exploitation ne seraient pas mesurables dans l'ensemble des stations.

Un changement des conditions hydriques des terrains peut provoquer une variation de leur poids. Lors de pluies importantes et persistantes, le poids des terrains se saturant peut augmenter. La charge sur les piliers va, par conséquent, augmenter pendant les périodes pluvieuses et diminuer pendant les périodes sèches.

La saturation et la désaturation du massif peuvent être dues, également, aux variations de l'hygrométrie à l'extérieur de la carrière. A cause de l'aérage, les variations de l'hygrométrie externe entraînent des variations à l'intérieur de la carrière.

Finalement trois hypothèses peuvent être retenues :

- une variation du poids des terrains à cause d'une variation des conditions hydriques,
- une variation de l'hygrométrie de l'atmosphère minière,
- une variation combinée du poids des terrains et de l'hygrométrie.

Compte tenu du caractère hygro-sensible du gypse, nous privilégions la seconde hypothèse et nous nous sommes intéressés à la variation de l'hygrométrie de l'atmosphère minière et aux changements de rythme de déformation des piliers.

Pour mettre en évidence une variation cyclique des changements de rythme de convergence, une analyse saisonnière semble justifiée. D'une manière générale, cette analyse consiste à faire une description fine des variations qui composent une série dite chronologique. Les paramètres mesurés sont dépendants du temps. Le résultat de cette description permet de faire ressortir les variations cycliques ou non cycliques qui sont plus ou moins masquées par la tendance (Spiegel, 1972 ; Berman et Bézard, 1973 ; Box et al., 1994 ; Hipel et McLeod, 1994). La méthode de calcul des indices saisonniers retenue est la suivante : les données de chaque mois s'expriment en pourcentage des valeurs mensuelles de la tendance. L'indice recherché s'obtient à partir d'une moyenne des pourcentages des mois correspondants (Figure 7). L'analyse saisonnière est réalisée sur les mesures de convergence relevées pendant près de 20 ans par l'exploitant. L'interprétation des variations d'indice sur une année type est la

suivante : quand l'indice est supérieur à 1, il s'agit d'une augmentation de la vitesse de la convergence et inversement, quand l'indice est inférieur à 1 : il s'agit d'un ralentissement de la convergence.

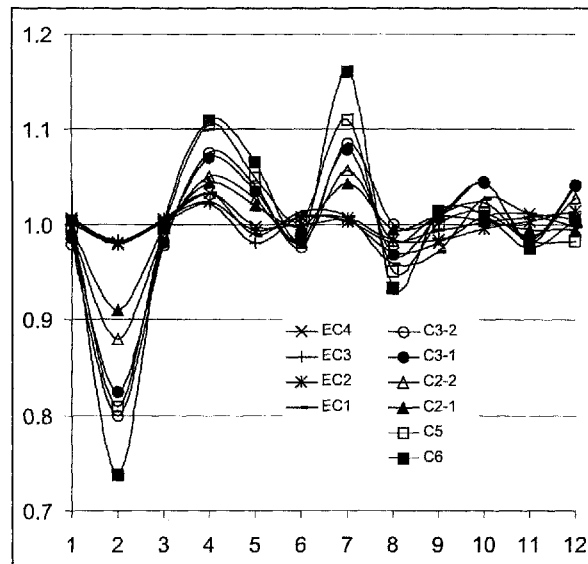


Figure 7. Variation des indices saisonniers des convergences de différentes galeries

Les différentes stations montrent des variations concordantes des indices saisonniers de convergence. Seule leur amplitude est différente. Une forte amplitude est synonyme d'un changement important de vitesse de convergence et inversement. Les accélérations de la convergence des galeries ont lieu à la fin de l'hiver jusqu'au début du printemps, au début de l'été et en automne.

La variation de ces indices saisonniers de convergence a été comparée à celle des indices saisonniers de précipitations mesurées par Météo France à quelques kilomètres du site exploité. Malgré une bonne concordance, il nous a semblé plus correcte de rechercher une corrélation entre les variations de convergence et celles de l'hygrométrie.

Si les variations de l'hygrométrie sont comparées avec celles des précipitations, une corrélation entre les deux est possible (Figure 8). Une période de fortes pluies semblent entraîner un pic d'hygrométrie avec un décalage d'environ un mois et demi. Cette relation est vraie uniquement pour les quartiers avec un aérage forcé. En effet, dans les quartiers sans aérage forcé donc anciens et fortement perturbés par de nombreux fontis, une forte pluie entraînerait un pic quasi immédiat de l'hygrométrie. Si l'on regarde les variations l'hygrométrie, elles semblent être corrélées à celles de la convergence des galeries dans les quartiers avec ou sans aérage (Figures 9 et 10). Il est également intéressant de remarquer que les périodes d'accélération de convergence (Figure 7) déterminées à partir des mesures effectuées entre 1978 et 1999 (Figure 3) sont toujours les mêmes. Elles ont eu et ont toujours lieu au mois d'avril, de juillet et de septembre-octobre.

Afin de valider la corrélation hygrométrie-comportement mécanique différé in situ, des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée ont été réalisés au laboratoire. Même si le comportement différé de ce matériau avait déjà fait l'objet d'études antérieures (Griggs, 1939, 1940 ; Griggs et Handin, 1960 ; Morlier, 1964), la mesure et le contrôle de l'hygrométrie ainsi que les mesures des déformations transversales n'avaient pas été envisagés.

4.2. Mesures expérimentales au laboratoire : validation

L'équipement nécessaire, pour réaliser des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée, est un bâti de fluage composé de trois principaux éléments : l'embase, le corps et la tête. Les volumes du récipient et du corps de la cellule ont été choisis en fonction de la norme NF EN ISO 483 et par rapport aux dimensions des éprouvettes qui font 38 mm de diamètre et un élanement de 2.

L'atmosphère autour de l'éprouvette a une hygrométrie contrôlée et constante pendant toute la durée de l'essai. Pour générer cette hygrométrie, un récipient dans lequel se trouve une solution saline saturée vient se positionner sous l'embase du bâti. Tout le dispositif est placé dans une salle climatisée afin de pouvoir maintenir la température constante et la plus proche possible de 20°C. La norme NF X 15-119 a servi de support technique pour les mesures d'hygrométrie en fonction de la température et les précautions d'emploi des solutions salines saturées. Sur les éprouvettes sont collées des jauges d'extensométrie pour mesurer les déformations axiales et les déformations latérales. Le protocole expérimental et les essais sont détaillés dans Auvray (2003). Le résultat des ces essais et leurs conditions expérimentales sont présentés sur les figures 11 et 12.

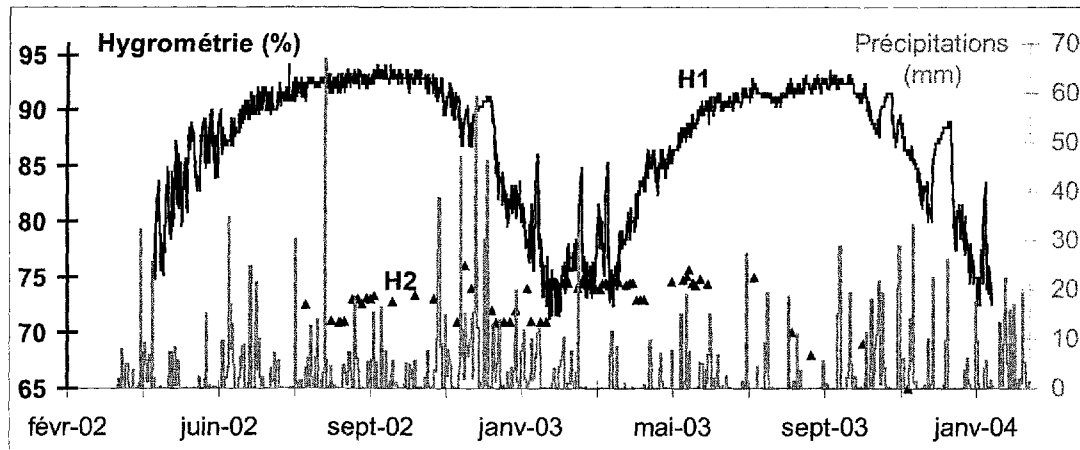


Figure 8. Corrélation entre hygrométries et précipitations (H1 : Hr avec aération forcée ; H2 : Hr sans aération forcée ; précipitations décalées)

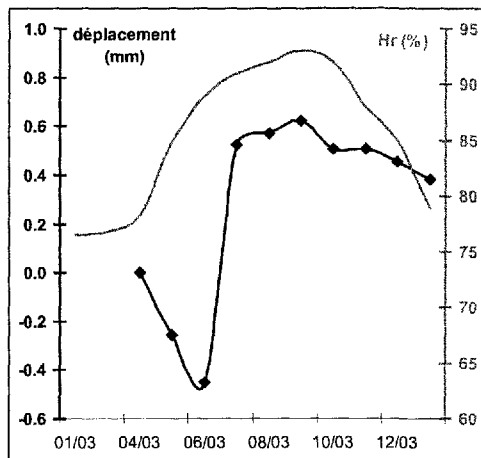


Figure 9. Variations de la convergence et de l'hygrométrie (quartier avec aération forcée)

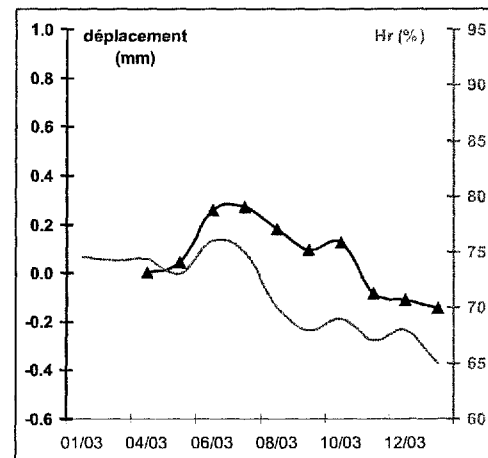


Figure 10. Variations de la convergence et de l'hygrométrie (quartier sans aération forcée)

Il apparaît clairement que la valeur de l'hygrométrie influence la quantité de déformation différée et par conséquent les vitesses de déformation différée. Les hypothèses permettant d'expliquer ces variations de vitesses de fluage en fonction de l'hygrométrie sont basées sur des travaux antérieurs. D'après Finot et al. (1997), une faible hygrométrie entre 10 et 30% provoque une migration des molécules d'eau vers la périphérie des cristaux. En effet, une des deux molécules d'eau constitutive du gypse a une énergie de liaison plus faible que l'autre (Mandal et Mandal, 2002), elle est alors considérée comme un anion. La conséquence de cette migration est la formation de dislocations dans les cristaux et la formation d'excroissances inférieures à 1 nanomètre observées au microscope à force atomique. Proche de 100%

d'hygrométrie, la dissolution entraîne une formation de microfissures sur la face (010) et sur les extrémités de la face.

Il semble donc que l'hypothèse émise à partir des mesures in situ ait été vérifiée grâce à la réalisation d'essais spécifiques au laboratoire malgré des échelles de temps et de dimension d'échantillons différentes.

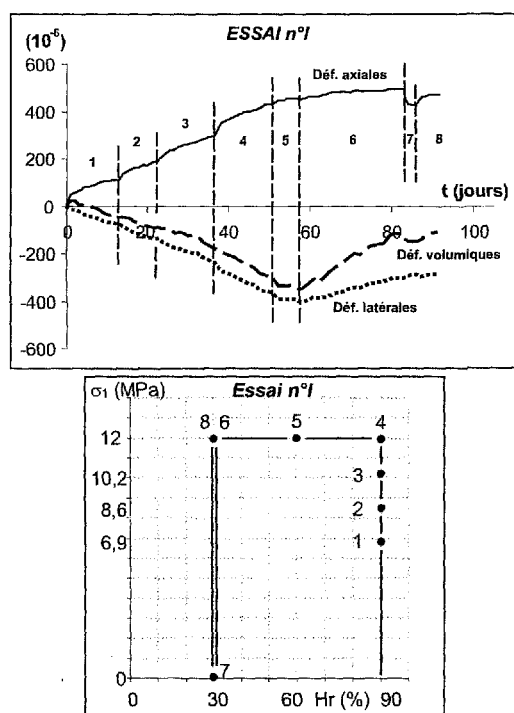


Figure 11. Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie initiale de 90%

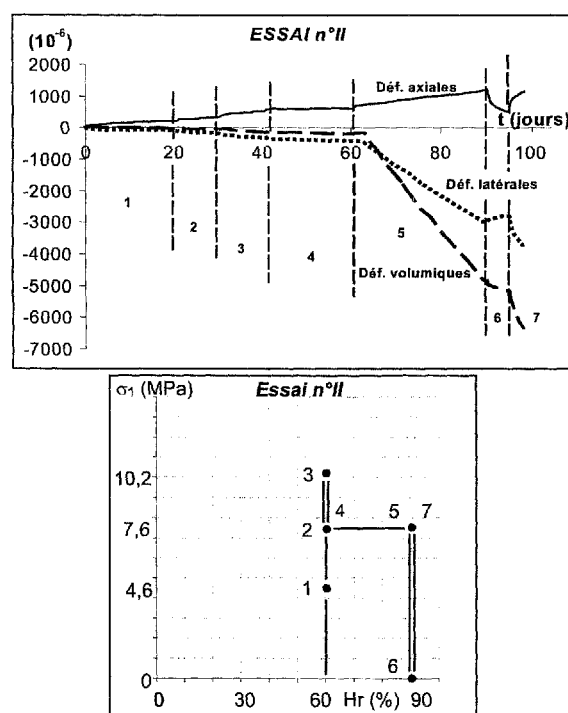


Figure 12. Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie initiale de 60%

5. Conclusions

L'analyse des mesures de convergence et d'expansion de piliers a permis de montrer que les vitesses de déformation sont concordantes entre elles et que le bord des piliers se déforme plus rapidement que le cœur.

Le calcul d'indice saisonnier de convergence semble montrer que quelle que soit la station considérée, les accélérations et les ralentissements de convergence se produisent à la même époque de l'année. Cependant, ce résultat est basé sur un relevé mensuel des mesures de convergence présentant un grand nombre de données manquantes. Toutefois, la reprise de ces mesures semble confirmer ces changements de rythmes de convergence.

Cette étude du comportement différé des piliers de gypse a permis d'avancer l'hypothèse d'une relation entre les accélérations/ralentissements de convergence et les variations de l'hygrométrie dans la carrière de Grozon. Ces variations sont une conséquence des variations des précipitations et des températures à l'extérieur. Cette hypothèse semble être vérifiée par des mesures récentes in situ et par des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée au laboratoire.

6. Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur Armangue de la société BPB Placo pour avoir fourni les données anciennes et avoir facilité l'accès à la carrière pour la reprise des mesures.

7. Références bibliographiques

- Aires-Barros R., Graça R. C., Velez A. (1975) Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. *Engineering Geology* (9), 249-265.
- Auvray C., Homand F., Sorgi C. (2004) The aging of gypsum in underground mine. *Engineering Geology*, to be published.
- Auvray C. (2003) *Vieillessement et comportement rhéologique du gypse*. Thèse de doctorat, INPL Nancy, 279 pages.
- Berman S., Bézard R. (1973) *Statistique – Probabilités, tome 1*. Chiron, 243 pages.
- Badens E. (1998) *Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques du plâtre pris pur et additive*. Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III, 124 pages.
- Bosbach D., Rammensee W. (1994) In situ investigation of growth and dissolution on the (001) surface of gypsum by scanning force microscopy, *Geochimica et Cosmochimica* 58 (2) 843-849.
- Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. (1994) *Time series analysis : forecasting and control*. Prentice Hall, 598 pages
- Canton Y., Solé-Benet A., Queralt I., Pini R. (2001) Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain : laboratory and field-based experimental approaches. *Catena* (44), 111-132.
- Finot E., Lesniewska E., Mutin J-C., Goudonnet J-P. (1997) *Reactivity of gypsum faces according to the relative humidity by scanning force microscopy*. *Surface Science* 384, 201-217.
- Griggs D. T. (1939) Creep of rocks. *Journal of Geology* 47, 225-251.
- Griggs D. T. (1940) Experimental flow of rocks under conditions favouring recrystallisation. *Geology Society America Bulletin*. 51, 1001-1022.
- Griggs D. T., Handin (1960) Rocks deformation. *Geology Society America Memory* 79.
- Hipel, K.W., McLeod, A.I. (1994) *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier Amsterdam, 1013 pages
- Jeannette D. (2000) Originalité des mécanismes d'altération sur les vestiges archéologiques de Délos (Cyclades, Grèce). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes* (330), 683-688.
- Jesschke A. A., Vosbeck K., Dreybrodt W. (2001) Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (1), 27-34.
- Mandal P. K., Mandal T. K. (2002) Anion water in gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). *Cement and Concrete Research* (32), 313-316.
- Morlier P.-J. (1964) *Etude expérimentale de la déformation des roches*. Thèse Université de Paris, Faculté des Sciences, 40 pages
- NF EN ISO 483 (1999) *Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses pour maintenir l'humidité relative à une valeur constante*. AFNOR
- NF X 15-119 (1999) *Mesure de l'humidité de l'air, Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres*. AFNOR
- Ramana Y. V., Gogte B. S. (1982) Quantitative studies of weathering in saprolized charnockites associated with a landslip zone at the Porthimund dam, India. *Engineering Geology* (19), 29-46.
- Spiegel M. R. (1972) *Théorie et applications de la statistique*. Série Schaum, McGraw-Hill, 358 pages
- Viles H. A., Moses C. A. (1998) Experimental production of weathering nanomorphologies on carbonate stone. *Quaternary Journal of engineering Geology* (31), 347-357.